

Anwendungspotential von leitfähiger Tinte für ausdruckbare Schaltkreise im Physikunterricht

Timo Becker, Stefan Heusler

*Institut für Didaktik der Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
timo-becker@freenet.de, stefanheusler@uni-muenster.de

Kurzfassung

Der folgende Artikel stellt eine neuartige Methode vor, elektrische Schaltkreise für den Schulunterricht selber herzustellen. Mit einer auf Silber-Nanopartikeln basierenden Tinte und einem handelsüblichen Tintenstrahldrucker lassen sich Schaltkreise direkt auf Papier drucken. Neben den notwendigen Komponenten zur Realisierung des leitfähigen Drucks werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für den Physikunterricht vorgestellt. Dazu zählen Experimente zur Fließvorstellung des elektrischen Stroms, sowie zur Kapazität. Als praktische Anwendungsmöglichkeit wird ein selbstgedruckter Füllstandsensors vorgestellt.

1. Einleitung

Elektrische Schaltungen sind die Grundlage aller elektronischen Geräte. Bevor die Schaltungen eines neuen elektronischen Gerätes in großen Mengen hergestellt werden, werden diese zunächst in Form von Prototypen getestet. In der Industrie werden häufig Prototypen mit sogenannten Steckplatinen (engl. Breadboard) oder gedruckten Schaltungen in Form von Leiterplatten (engl. Printed Circuit Board, kurz PCB) verwendet.

Kawahara et. al. [1] haben kürzlich eine neuartige Methode für die Herstellung von Schaltkreisprototypen vorgestellt, die das unkomplizierte Ausdrucken von Schaltkreisen auf papierähnliche Materialien ohne großen finanziellen und technischen Aufwand ermöglicht. Hierzu wird nur ein handelsüblicher Tintenstrahldrucker, eine spezielle, auf Silber-Nanopartikeln basierende leitfähige Tinte, und ein geeignetes Medium zum Bedrucken benötigt. Der Preis für die gesamten Anschaffungen beläuft sich dabei auf ca. 430€ (siehe Tab. 1). Diese Methode der ausdruckbaren Schaltkreise zeichnet sich somit durch vergleichsweise geringe Kosten, die unkomplizierte Anschaffung der Geräte, die Flexibilität der papierähnlich bedruckbaren Materialien sowie durch die Schnelligkeit bei der Herstellung aus. Vor dem Hintergrund dieser Faktoren und den zahlreichen Möglichkeiten ausdrückbarer Schaltungen kann eine derartige Anschaffung durchaus auch für eine Schule attraktiv sein (vgl. [1]). Im Folgenden soll zunächst auf die nötigen Komponenten zur Einführung dieser Technik eingegangen werden. Dazu zählen u.a. die Auswahl von Drucker, Tinte und bedruckbarem Medium. Anschließend werden verschiedene Anwendungsmöglichkeiten für den Physikunterricht vorgestellt. Zunächst werden Anwendungen im Kontext der Fließvorstellung nach Martin Wagenstein vorgestellt [3]. Hier sollen vor allem die Be-

griffe des elektrischen Stroms und Widerstands näher betrachtet werden. Anschließend wird das Thema des elektrischen Widerstands und der Kapazität behandelt, wobei Versuche zum quantitativen Verständnis dieser physikalischen Größen vorgestellt werden. Abschließend wird als einfach zu realisierende praktische Anwendung ein kapazitiver Füllstandsensors diskutiert.

2. Tintenstrahldruck von Schaltkreisen mit Silber-Nanopartikel-Tinte

Auswahl der Tinte

Leitfähige, für einen Tintenstrahldrucker geeignete Tinte ist keinesfalls eine Neuheit im Bereich der Forschung, sondern wird schon seit vielen Jahren angewendet. Um die gedruckten Spuren leitfähig zu machen, ist allerdings ein sogenannter Sinterprozess notwendig, der zu einer Veränderung der Materialeigenschaften führt. Dieser Prozess wird beispielsweise durch Wärmebehandlung, Mikrowellen- oder Laserbestrahlung hervorgerufen. Kawahara et al. [1] beschreiben in ihrem Artikel eine neuartige Tinte, die keine spezielle Behandlung zur Erzeugung der Leitfähigkeit benötigt und für den Tintenstrahldruck geeignet ist. Dies wird durch die erst kürzlich entwickelte Methode des chemischen Sinterns ermöglicht. Durch den Kontakt mit der Luft wird die Tinte unmittelbar nach dem Drucken leitfähig. Für die hier vorgestellten Experimente wurde die Tinte der Firma „Mitsubishi Paper Mill“ mit der Artikelbezeichnung „NBSIJ-MU01“ verwendet.

Auswahl des Druckers

Für den leitfähigen Druck mit der Silber-Nanopartikel-tinte können nicht alle handelsüblichen Tintenstrahldrucker genutzt werden. Nach eigenen

Angaben der Firma „Mitsubishi Paper Mill“ eignen sich unterschiedliche Modelle des Druckerherstellers „Brother Co“. Für den Din A4-Druck werden die Modelle „DCP-J132W“, „DCP-J152W“, „DCP-195C“ und für den Din A3-Druck das Modell „MFC-J5910DW“ empfohlen. Nach Kawahara et al. [1] zeichnen sich Modelle dieses Herstellers besonders dadurch aus, dass die Druckerköpfe ein größeres Volumen an Tinte abgeben als vergleichbare Modelle anderer Hersteller. Daraus ergibt sich eine größere Dicke der gedruckten Spuren, die wesentlichen Einfluss auf die Leitfähigkeit hat. Für die folgenden Versuche wurde das Modell „DCP-J132W“ erworben. Es wird weiterhin empfohlen, die Tinte in leere, unbenutzte, wiederauffüllbare Patronen zu füllen. Diese lassen sich ebenfalls problemlos bei diversen Internetanbietern erwerben. Bereits benutzte Patronen mit der leitfähigen Tinte aufzufüllen könnte sich nach Angaben des Herstellers negativ auf die Leitfähigkeit auswirken.

Auswahl des bedruckbaren Mediums

Das handelsübliche, für den Tintenstrahldrucker hergestellte Papier ist üblicherweise chemisch beschichtet, um einerseits die Tinte optimal zu absorbieren und andererseits ein Verschmieren zu verhindern. Zudem weist die Paperoberfläche eine gewisse Porosität auf, die nach Kawahara et al. [1] eine entscheidende Rolle beim chemischen Sintern und bei der Strukturbildung der Silber-Nanopartikel einnimmt. Die Firma „Mitsubishi Paper Mill“ bietet neben ihrer leitfähigen Tinte auch speziell für den leitfähigen Druck geeignete Medien an. Dazu zählen mit Harz beschichtete Papiere sowie transparente und weiße Kunststoffblätter auf Basis von Polyethylenterephthalat (PET). Für die folgenden Experimente wurde auf das spezielle, mit Harz beschichtete Papier zurückgegriffen. Mit diesem Papier ließen sich, wie erwartet, hervorragende Ergebnisse in Bezug auf die Leitfähigkeit erzielen. Beispielsweise ergab sich für eine 1mm breite und 10cm lange Spur ein Widerstand von 21 Ohm. Dies entspricht einem Flächenwiderstand von 0,21 Ohm/sq. Die äußeren Bedingungen haben einen nicht zu vernachlässigen Einfluss auf die Leitfähigkeit der gedruckten Spuren. Beispielsweise ergibt sich ein leichter Abfall des Widerstands, wenn das bedruckte Papier in eine warme Umgebung mit hoher Luftfeuchtigkeit ausgesetzt wird. In Tabelle 2 werden zusammenfassend für den leitfähigen Tintenstrahldruck benötigten Komponenten und deren Preise aufgelistet. Genauere Angaben zu der Inbetriebnahme des Druckers können der Masterarbeit von T. Becker entnommen werden.

Komponente	Preis
Tinte	190€
Drucker	100€
Leere Druckerpatronen	30€
Papier (100 Blatt)	110€
Summe	430€

Tab. 1: Auflistung der für den Druck nötigen Komponenten und deren Preise

3. Anwendungsmöglichkeiten im Physikunterricht

Fließvorstellung des elektrischen Stroms

Fließvorstellungen sind für elektrische Stromkreise keinesfalls offensichtlich. So lässt sich z.B. beim Beobachten technischer Geräte keine Strömung erkennen. An einem glühenden Draht, der beispielsweise eine Batterie kurzschließt, lässt sich allerdings nach Wagenschein eine Fließvorstellung herleiten [3].

Ein gutes Alltagsbeispiel für die Fließvorstellung des elektrischen Stroms bietet ein handelsüblicher Gartenschlauch (vgl. Abb. 1).

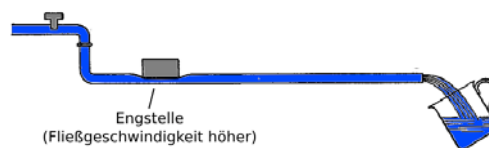


Abb.1: Gartenschlauch mit fließendem Wasser als Analogon zum stromdurchflossenen Draht (nach [3, S. 281])

In diesem Zusammenhang lässt sich eine „Stromstärke“ einführen, welche sich als Wasservolumen pro Zeiteinheit definieren lässt. Sie muss an allen Stellen des Schlauches den gleichen Wert besitzen. Dies resultiert daraus, dass das Wasser im Schlauch nicht ausweichen, sich nicht komprimieren und sich demzufolge vor den Engstellen auch nicht stauen kann. Eine Verlängerung des Schlauches führt bei gleichbleibendem Wasserdruck zur Reduzierung der Wasserstromstärke. Als Ursache kann hier die Reibung des Wassers mit der Schlauchwand genannt werden. Zudem tritt die Veränderung im gesamten Schlauch auf. Es lässt sich in diesem Zusammenhang auch von einer Erhöhung des Wasserwiderstands durch die Verlängerung des Schlauches sprechen. Eine Verengung des Schlauches, die sich z.B. aus der Belastung mit einem Gegenstand ergibt, erhöht die Fließgeschwindigkeit in dieser Engstelle und führt gleichzeitig zur Abnahme der Wasserstromstärke im gesamten Schlauch [3]. Der wasserdurchflossene Gartenschlauch stellt ein anschauliches Modell für eine Strömung dar. Die Frage ist, wie sich die gewonnenen Vorstellungen auf elektri-

sche Phänomene mit „elektrischem Strom“ transferieren lassen. Hier bietet sich die leitfähige Tinte in besonderem Maße an. Die folgenden Versuchsbeispiele sollen dazu dienen, die mit dem Gartenschlauch gewonnene Fließvorstellung auf elektrische Phänomene zu transferieren. Dabei steht zunächst das qualitative Verständnis im Vordergrund. Neben einer Wärmebildkamera werden für die Versuchsdurchführung eine konstante Spannungsquelle (Netzgerät, Batterie), diverse gedruckte leitfähige Spuren, Kabel und Krokodilklemmen benötigt. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 2 veranschaulicht.

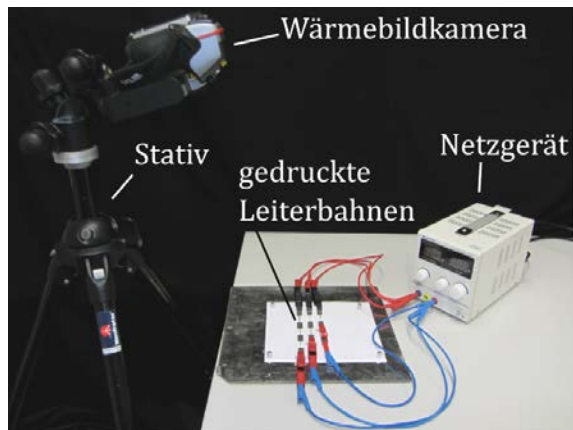


Abb.2: Versuchsaufbau für die Wärmebildaufnahme von stromdurchflossenen Leiterbahnen.

Durch das Anlegen einer Spannung erwärmen sich die Leiter je nach ihrer Form unterschiedlich stark. Diese Temperaturunterschiede werden mit der Wärmebildkamera aufgenommen. Dabei wird der angezeigte Temperaturbereich der Wärmebildkamera im manuellen Modus so angepasst, dass die angestrebten Temperaturunterschiede optimal zur Geltung kommen. Beim Hochregeln der Spannung ist höchste Vorsicht geboten, da die gedruckten Spuren bei zu hohen Spannungswerten schon nach sehr kurzer Zeit durchbrennen. Zu hohe Temperaturen führen zum unwiderruflichen Verlust der Leitfähigkeit. Die folgenden Wärmebildaufnahmen sollen dazu dienen, die Fließvorstellung auf den elektrischen Strom zu transferieren.

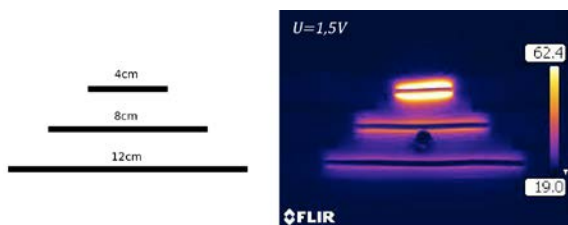


Abb.3: Wärmebildaufnahme zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Stromstärke von der Länge des Leiters.

Es zeigt sich, dass die Temperatur mit der Leiterlänge abnimmt. Da die Temperatur mit sinkender Fließgeschwindigkeit der Elektronen abnimmt, deutet die Wärmebildaufnahme eindeutig auf eine Abnahme des elektrischen Stroms mit steigender Leiterlänge hin. Dieser Versuch spiegelt demnach genau das Verhalten des Wasserschlauchs wider und eignet sich daher sehr gut für den Transfer der Fließvorstellung auf den elektrischen Strom. In Analogie zur Fließvorstellung lässt sich auch hier von einer Erhöhung des Widerstands durch die Verlängerung des Schlauches sprechen. In diesem Fall handelt es sich jedoch nicht um den Wasserwiderstand, sondern um den elektrischen Widerstand.

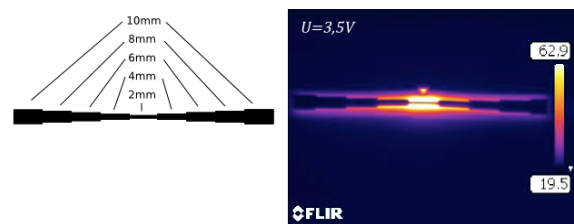


Abb.4: Wärmebildaufnahme zur Veranschaulichung der Abhängigkeit der Stromstärke von der Breite des Leiters.

Abb. 4 zeigt, dass die Temperatur mit abnehmender Linienbreite ansteigt. Die Stromstärke muss in der gesamten Leiterbahn den gleichen Wert besitzen. Dies resultiert daraus, dass sich das Elektronengas im Leiter bezüglich der Kompressibilität ähnlich wie Wasser verhält: Obwohl hier von einem Gas gesprochen wird, lässt es sich nicht komprimieren oder stauen. Aus diesem Grund kann die Temperaturänderung nicht durch Veränderungen der Stromstärke hervorgerufen werden. Da die Temperatur aber von der Fließgeschwindigkeit abhängt, deutet diese Aufnahme eindeutig darauf hin, dass die Fließgeschwindigkeit des elektrischen Stroms mit sinkender Linienbreite zunimmt. Auch dieses Verhalten steht im Einklang mit dem Modell nach Wagenschein [3] und eignet sich daher für den Transfer der Fließvorstellung auf den elektrischen Strom.

Abhängigkeit des elektrischen Widerstands von Länge und Querschnitt des Leiters

In diesem Abschnitt sollen Möglichkeiten für das Experimentieren mit leitfähiger Tinte in Bezug auf den elektrischen Widerstand vorgestellt werden. Dabei gilt es vor allem, die Abhängigkeit des Widerstands von der Länge L und dem Querschnitt A des Leiters zu verdeutlichen. Der elektrische Widerstand ist definiert als

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

Zunächst soll der Leiter betrachtet werden. Dieser ist im einfachsten Fall eine gerade Linie. Schematisch wird diese Linie in Abbildung 5 dargestellt.

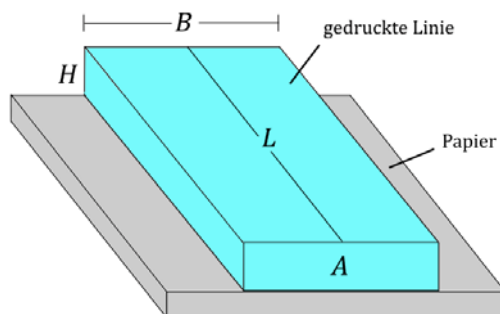


Abb.5: Schematische Darstellung der gedruckten Linie mit Länge L , Breite B , Höhe H und Querschnitt A

Für das Verständnis der weiteren Ergebnisse ist es wichtig, zu verdeutlichen, dass auch die auf Papier gedruckte Linie eine gewisse Höhe und damit einen, wenn auch verhältnismäßig geringen, Querschnitt aufweist. Da die Schichtdicke der gedruckten Bahnen grundsätzlich vom Drucker abhängt und mehr oder weniger konstant ist, lässt sich der Querschnitt im Normalfall nur mit Veränderungen der Linienbreite variieren.

Das nun vorgestellte Experiment verdeutlicht die Abhängigkeit des Widerstands von Länge und Querschnitt. Die Idee besteht darin, Linien zu drucken, bei denen genau diese beiden Faktoren variieren. Abbildung 6 zeigt zwei Realisierungsmöglichkeiten für die Variation von Länge und Querschnitt der gedruckten Linien. Zur Verdeutlichung der Abhängigkeit vom Querschnitt werden mehrere Linien mit einer konstanten Länge von 5cm gedruckt, wobei sie nach aufsteigender Breite angeordnet sind (vgl. Abbildung 6a). Das Intervall zwischen den einzelnen Linien beträgt 0,1mm. Zur Veranschaulichung der Abhängigkeit von der Länge werden ebenfalls mehrere Linien gedruckt. Im Vergleich zu Abbildung 6a weisen diese Linien eine konstante Breite von 1mm mit variierender Länge auf (vgl. Abbildung 6b). Das Längenintervall beträgt bei diesem Muster 2mm.

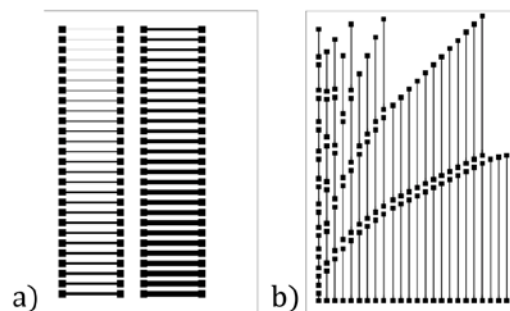


Abb.6: Druckmuster für die Herleitung des elektrischen Widerstands; a) Linien mit variierender Breite (Querschnitt); b) Linien mit variierender Länge

Nach dem Ausdrucken der Muster aus Abbildung 6 besteht der nächste Schritt darin, die Widerstände der einzelnen Linien zu bestimmen und zu dokumentieren. Ein handelsübliches Multimetermessgerät reicht für diese Messungen aus (vgl. Abb. 7).

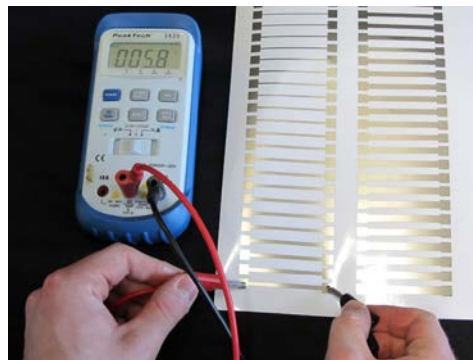


Abb.7: Messvorgang zur Bestimmung der Widerstände der gedruckten Leiterbahnen

Die Abbildungen 8 und 9 zeigen die Widerstände in Abhängigkeit der Linienbreite bzw. Linienlänge.

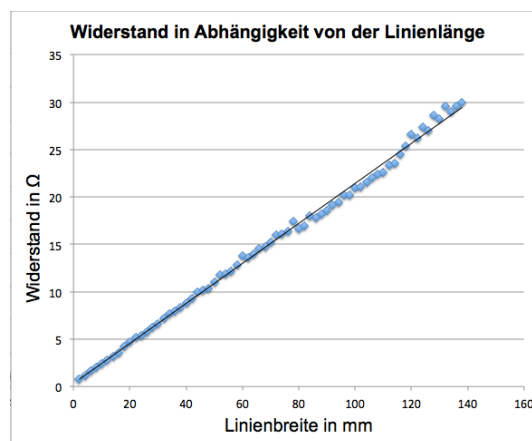


Abb.8: Graphische Darstellung des Widerstands in Abhängigkeit von der Linienlänge (eigene Darstellung)

Werden die einzelnen Messwerte mit der vom Programm Excel automatisch berechneten linearen Trendlinie verglichen, so können die Schüler durch eigene Experimente auf den linearen Zusammenhang von Widerstand und Länge des Leiters schließen.

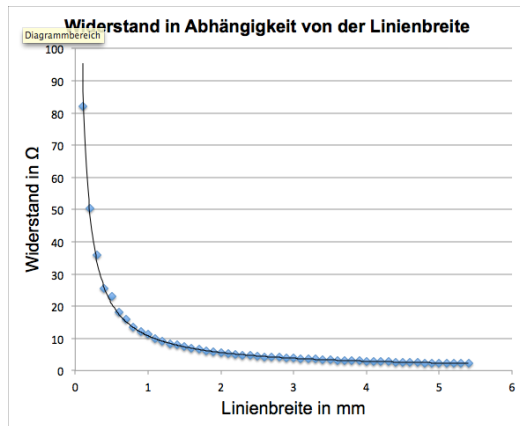


Abb.9: Graphische Darstellung des Widerstands in Abhängigkeit von der Linienbreite

Abbildung 9 zeigt den elektrischen Widerstand in Abhängigkeit von der Linienbreite. Auch hier ergeben sich kaum Abweichungen von der automatisch hinzugefügten Trendlinie. Der Graph gleicht dabei stark dem Verlauf der theoretisch zu erwartenden Hyperbelgleichung $y = \frac{1}{x-1}$ nach Gleichung {1}. Für die in Abbildung 43 dargestellte Trendlinie berechnet das Programm Excel die Formel $R = 10,797L - 0,946$.

Die soeben beschriebenen Experimente bieten eine attraktive und einfach zu realisierende Möglichkeit zur experimentellen Herleitung von Gleichung {1} für den elektrischen Widerstand.

Abhängigkeit der Kapazität eines Plattenkondensators von Plattenabstand und- Querschnitt

Die Kapazität eines Plattenkondensators ist definiert als

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

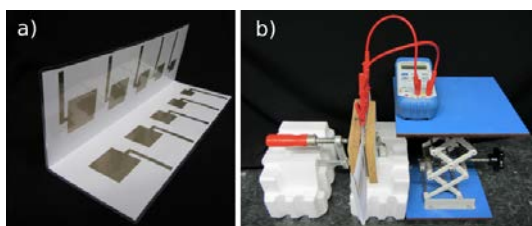


Abb. 10: Links: Modell des Klappkondensators. Rechts: Versuchsaufbau zur Bestimmung der Kapazität

Das Ziel des folgenden Versuchs besteht darin, die Abhängigkeit der Kapazität von Fläche A und Abstand d der Platten experimentell herzuleiten. Die Idee besteht bei diesem Experiment darin, Quadrate bzw. Platten mit variierendem Querschnitt zu drucken. Damit die gedruckten Muster zu Plattenkondensatoren werden, muss das Papier exakt in der Mitte geknickt werden. Nur so ist ein vollständiges Überlappen der beiden Flächen gewährleistet. Nach

dem Knicken der Muster besteht der nächste Arbeitsschritt darin, die Kapazitäten der einzelnen Kondensatoren zu messen. Der Messvorgang lässt sich auf einfache Art und Weise mit einem Multimeter messgerät realisieren, welches über eine Kapazitätsmessfunktion verfügt (vgl. Abb. 10).

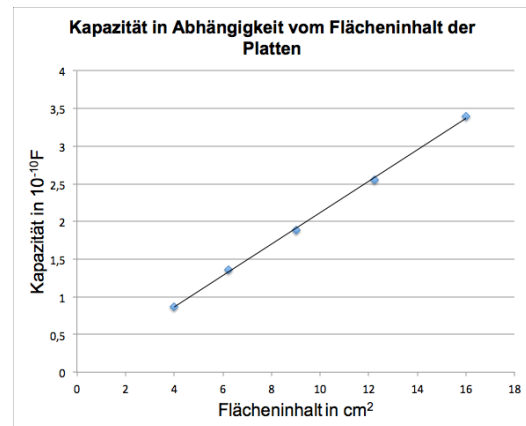


Abb. 11: Verlauf der Kapazität in Abhängigkeit vom Flächeninhalt der Platten

Der Verlauf der Kapazität lässt eindeutig auf einen linearen Zusammenhang zwischen der Kapazität des Plattenkondensators und dem Flächeninhalt der Platten schließen. Die Abweichungen von der linearen Trendlinie sind minimal.

Abb. 12 zeigt den Verlauf der Kapazität in Abhängigkeit vom Plattenabstand. Als Abstandshalter wurden Klarsichtfolien genutzt. Zur Veränderung des Plattenabstands wurde dabei die Anzahl der Schichten verändert. Der Verlauf der Schichtdicke lässt eindeutig auf einen $1/x$ -förmigen Verlauf schließen. Dies spiegelt sich ebenfalls in der von Excel berechneten Formel für die Trendlinie der Kapazität wider. Diese lautet $C = 5,5446 \cdot 10^{-10} S^{-0,932}$, wobei S die Anzahl der Schichten darstellt.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt entsprechen die gemessenen Kapazitätswerte den theoretischen Erwartungen. Demnach stellt dieses Experiment eine einfach zu realisierende Möglichkeit zur Herleitung der Kapazität eines Plattenkondensators dar.

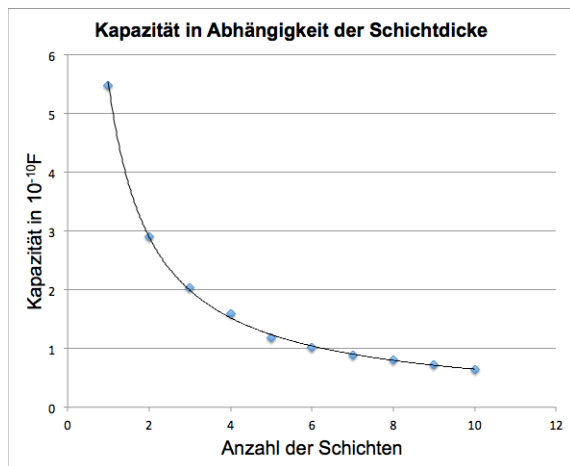


Abb. 12: Kapazität des Klappkondensators in Abhängigkeit der Schichtdicke mit Klarsichtfolie als Abstandshalter

3. Praktische Anwendung von gedruckten Kondensatoren – Der Füllstandsensor

Im Vergleich zum Plattenkondensator besteht auch die Möglichkeit, zweidimensionale Kapazitäten direkt zu drucken. Insbesondere in der Mikrosystemtechnik werden diese häufig in Form von interdigitalen Kondensatoren (IDC) genutzt. Durch die ineinandergreifende Kammstruktur der im nahen Abstand gegenüberliegenden Elektroden wird die Kapazität im Vergleich zur Kapazität paralleler linienförmiger Leiter erhöht. Grundsätzlich lassen sich die IDCs mit einer Parallelschaltung sehr vieler paralleler Linien bzw. Elementarzellen vergleichen (vgl. Abb. 13). Sie werden z.B. zur Messung von chemischen Konzentrationen in Flüssigkeiten und Gasen angewendet (vgl. [2]). Im folgenden Abschnitt werden sie als Füllstandsensor verwendet. Wichtig ist hier, dass der IDC nach dem Ausdrucken in Folie einlaminiert wird, um das Papier zum einen vor der Flüssigkeit zu schützen und zum anderen einen elektrischen Kontakt der einzelnen Linien zu verhindern.

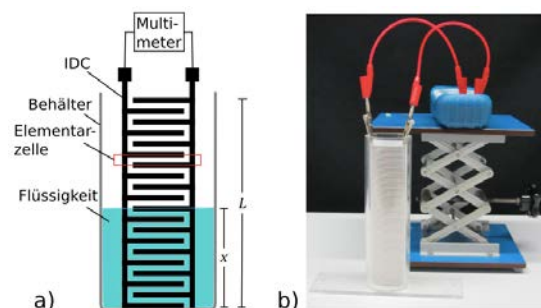


Abb. 13: Links: Schematischer Aufbau des Füllstandmessers. Rechts: Realer Versuchsaufbau

Mit einem Multimeter wird die Kapazität des IDC gemessen. Diese hängt dabei von der Anzahl an mit Flüssigkeit bedeckten Elementarzellen zusammen. Abb. 14 zeigt den Verlauf der Kapazität in Abhängigkeit der Füllhöhe.

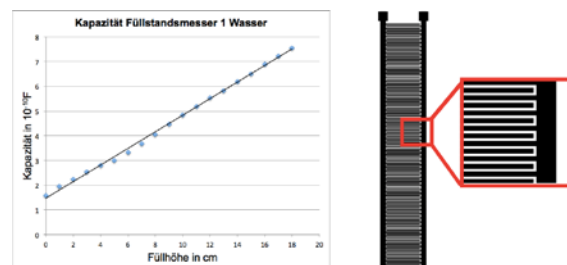


Abb. 14: Kapazität des IDC in Abhängigkeit von der Füllhöhe

Der Verlauf der Kapazität hängt neben der Form des IDC auch von der verwendeten Flüssigkeit bzw. von der Dielektrizitätskonstante der verwendeten Flüssigkeit ab. Auffällig ist jedoch der lineare Verlauf, der ein indirektes Ablesen der Füllhöhe über die Kapazität ermöglicht.

4. Zusammenfassung

Wie gezeigt werden konnte, lassen sich mit der Methode ausdrückbarer Schaltkreise vielseitige Ziele realisieren. Viele der vorgestellten Experimente lassen sich zudem mit geringem zeitlichen und materiellen Aufwand durchführen. Häufig werden neben den ausgedruckten Leiterbahnen lediglich diverse Kabel und ein Multimeter benötigt. Mit Ausnahme der Wärmebildkamera sollten alle in dieser Arbeit verwendeten Materialien in jeder physikalischen Schulsammlung vorhanden sein. Dieser Artikel stellt nur eine kleine Sammlung an möglichen Anwendungen dar. Er kann dabei sicherlich als Anregung für weitere Experimente angesehen werden. Auch für die Sekundarstufe II sind viele weitere Anwendungsmöglichkeiten der leitfähigen Tinte denkbar.

Das Anwendungspotential dieser Methode ist hiermit noch lange nicht ausgeschöpft, denn sie findet nicht nur im schulischen Kontext, sondern auch in der Grundlagenforschung Verwendung, wie etwa bei Arbeiten zu Metamaterialien [4].

1. Literatur

- [1] Kawahara, Y., Hodges, S., Cook, B.S., Zhang, C. & Abowd, G.D. (2013). Instant Inkjet Circuits: Lab-based Inkjet Printing to Support Rapid Prototyping of UbiComp Devices. UbiComp'13, 363-372
- [2] Sesterhenn, M. (2001). Mikromechanische Füllstandsensoren. Dissertation, Universität Stuttgart
- [3] Wagenschein, M. (1995). Die pädagogische Dimension der Physik. Aachen-Hahn: Hahner Verlag
- [4] M. Walter, A. Ortner, H. Meier, U. Löffelmann, P. J. Smith, J.G. Korvink, Terahertz metamaterials fabricated by inkjet printing, App. Phys. Lett. 96, 251107 (2009)